

частных производных. – Л., М.: ОНТИ НКТИ СССР, 1936. – 528 с.

6.Строй А.Ф. Управление тепловым режимом зданий и сооружений. – К.: Вища шк., 1993. –155 с.

7.Кутний Б.А. Математична модель для регулювання відпуску теплоти в умовах нестационарного теплового режиму опалюваних будівель // Галузеве машинобудування, будівництво: Зб. наук. праць / Полт. держ. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Вип.2. – Полтава, 1998. – С.110-119.

Отримано 19.10.2010

УДК 666.64-413

В.А.МАЛЯРЕНКО, д-р техн. наук

Харківська національна академія міського господарства

В.Н.ГОЛОЩАПОВ, Н.О.ОРЛОВА, кандидати техн. наук

Інститут проблем машинобудування НАН України ім. А.М. Підгорного, м. Харків

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ БУДИНКІВ З УРАХУВАННЯМ ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ

Наведено методику керування тепловим режимом житлових будинків, яка дозволяє при відомих геометричних і теплофізичних характеристиках будівель визначати рівень тепловіддачі на зовнішніх огороженнях і температуру приміщення з урахуванням погодних умов, розташування і теплового навантаження будинків.

Приведена методика управління тепловим режимом жилих домов, позволяющая при известных геометрических и теплофизических характеристиках зданий определять уровень теплоотдачи на внешних ограждениях и температуру помещений с учетом погодных условий, расположения и тепловой нагрузки домов.

The techniques of management of apartment houses thermal conditions has been proposed. Technique allow to define levels of heat emission for outside borders, inside temperature and including into consideration the weather condition, location and thermal load of apartment houses in terms of given geometrical and heat physical characters.

Ключові слова: будівлі, огорожуючі конструкції, моделі, методика, тепловий баланс, управління.

У зв'язку з різким подорожчанням природного газу особливо гострим на Україні є питання енергозбереження. При цьому житлово-комунальне господарство країни споживає більш третини всіх паливно-енергетичних ресурсів. Для зниження енергоспоживання пропонуються різноманітні проекти реконструкції житлових будинків типових серій і будинків, що тільки проектується та вводяться в експлуатацію, з ефективним використанням енергії. Оцінка потенціалу енергозбереження проводиться за міжнародними стандартами та іншими нормативами.

Потенціал енергозбереження будівель оцінюється згідно з міжнародними стандартами та іншими нормативними актами. До цього часу відсутня єдина наукова методика, яка б дозволяла проводити загальну

оцінку теплового балансу всіх будинків: як тих, що побудовані і реконструюються, так і тих, що тільки вводяться в експлуатацію (з урахуванням їх розташування, напрямку вітру, зміни температури зовнішнього повітря).

Проектування енергоефективних будівель зводиться до вирішення задач системного аналізу, які включають до себе наступні основні етапи [1]:

- побудова математичної моделі енергетичної взаємодії будівлі із зовнішніми збурюючими факторами;
- визначення граничних умов взаємодії з довкіллям;
- формулювання і вирішення оптимізаційної задачі.

Розглянемо головні складові процесу управління тепловим режимом об'єктів з врахуванням зовнішніх збурюючих впливів, яка потребує вирішення означених вище задач та розробки методики керування тепловим навантаженням будівлі й теплового району.

Нестационарний тепловий режим приміщення представимо як процес, який включає окремі періоди охолодження і нагріву на визначеному інтервалі зміни зовнішніх збурюючих впливів (значення швидкості вітру і температури зовнішнього повітря t_n). Останню оцінимо шляхом контролю зміни температури зовнішнього повітря в інтервалі 3, 6, 12 і 24 години протягом декількох опалювальних періодів. Зокрема, для опалювальних сезонів м.Харкова (2001-2002, 2002-2003, 2003-2004 рр.), вона склала 12 годин [2].

Математична модель керування тепловим режимом приміщення базується на тепловому балансі приміщення з урахуванням нестационарної теплопровідності через огорожуючі конструкції і (при несиметричних граничних умовах на внутрішній і зовнішній поверхнях) при $t_b = \text{const}$ має вигляд:

$$t_n(\tau) = t_b + \frac{\alpha_b \cdot F_{\text{ст}}}{\alpha_i F_i} (t_b + t(0, \tau)) + \frac{k_{\text{ок}} F_{\text{ок}}}{\alpha_i F_i} (t_b - t_n) + \frac{Q_{\text{п}}}{\alpha_i F_i} + \frac{Q_{\text{вент}}}{\alpha_i F_i}. \quad (1)$$

В рівнянні (1) $F_i, F_{\text{ст}}, F_{\text{ок}}$ – площа джерела теплоти (радіатора), зовнішніх стін і вікон, відповідно; α_i, α_b – коефіцієнт тепловіддачі на поверхні зовнішньої стіни і джерела теплоти та внутрішньої стіни; t_n – середня температура джерела теплоти; $t_n = (t_{\text{пр}} - t_{\text{обр}})/2$; t_b – температура повітря усередині розглянутого приміщення, $^{\circ}\text{C}$; t_n – температура зовнішнього повітря, $^{\circ}\text{C}$; $t(0, \tau)$ – температури на внутрішній поверхні зовнішньої стіни; $Q_{\text{п}}$ – тепловтрати через перекриття (для приміщень першого або останнього поверху).

Запишемо рівняння (1) для панельних будинків блокового типу з: товщиною зовнішньої стіни $\delta = 0,35$ м, теплопровідністю $\lambda = 0,37$ Вт/(м К) [3], коефіцієнтом тепловіддачі на внутрішній поверхні $\alpha_n = 7,3$ Вт/(м²К). Після перетворення рівняння нестационарної теплопровідності за допомогою методу Фур'є модель керування тепловим режимом приміщення (1) прийме наступний вигляд:

$$t_n(\tau) = 21,5 + 7,3 \frac{F_{ct1}}{\alpha_n F_n} (21,5 - t(0, n) - \sum_{i=1}^4 A_{i_{ct1}} \cdot e^{-\alpha_i^2 (\tau - 0,77)}) + 7,3 \frac{F_{ct2}}{\alpha_n F_n} \times \\ \times (21,5 - t'(0, n) - \sum_{i=1}^4 A_{i_{ct2}} \cdot e^{-\alpha_i^2 (\tau - 0,77)}) + \frac{k_{ок} \cdot F_{ок}}{\alpha_n F_n} (21,5 - t_n) + \frac{Q_{вент}}{\alpha_n F_n} + \frac{Q_n}{\alpha_n F_n}, \quad (2) \\ \sum_{i=1}^4 A_i \cdot e^{-\alpha_i^2 (\tau - 0,77)} = (t_n(0) + 1,5) (0,716 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha_n^2 + 3,59 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_n - 0,5297) \times \\ \times 0,99965 \left[0,895 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_n^2 + 5,25 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha_n + 22,36 \right]^2 \cdot (\tau - 0,77),$$

де F_{ct1} , F_{ct2} – площа зовнішніх стін, відповідно; $\sum_{i=1}^4 A_{i_{ct1}} \cdot e^{-\alpha_i^2 (\tau - 0,77)}$,

$\sum_{i=1}^4 A_{i_{ct2}} \cdot e^{-\alpha_i^2 (\tau - 0,77)}$ – коефіцієнти, які обчислюються для кожної стіни, виходячи з рішення характеристичного рівняння; $t'(0, \infty)$ – температури на внутрішній поверхні відповідної стіни. У момент часу $\tau = 0$ огороження досягає стаціонарного теплового стану. Відсутність однієї зі стін враховується в рівнянні (2) коефіцієнтом $A_{i_{ct2}} = 0$.

При визначенні граничних умов на зовнішніх поверхнях стін прийнято, що пульсаційна складова швидкості $\bar{U}(Z)$ містить постійну (середню в часі) і подовжню пульсаційну складові U' , що визначаються залежністю Давенпорта [4]

$$U' = 0,3 \cdot \bar{U}(Z). \quad (3)$$

В рівнянні (3) $\bar{U}(Z)$ швидкість вітру перед будинком на висоті Z від поверхні землі

$$\bar{U}(Z) = U_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^n, \quad (4)$$

де n – показник ступеня, що залежить від рельєфу місцевості і швидкості U_0 ; h_0 – висота розташування флюгера; U_0 – швидкість вітру на висоті h_0 [4].

При натіканні потоку вітру на стіну будинку на її більшій частині формується область гальмування, а на краях (на відстані близько 4,5-5 м) області градієнтної течії, викликані поворотом потоку перед боковими стінами і дахом [5]. Прийемо довжину області градієнтної течії $l=5$ м. У цьому випадку коефіцієнт тепловіддачі в області гальмування потоку, що натікає перпендикулярно на стіну, для областей зміни пульсаційної складової $U' < 6,5$ м/с визначиться залежністю

$$\alpha_0 = 23,85 \cdot U' . \quad (5)$$

Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі в області градієнтної течії дорівнює:

$$\alpha = 0,708 \cdot \alpha_0 . \quad (6)$$

Підставивши (5) і (4) в (6), одержимо розподіл коефіцієнта тепловіддачі в області градієнтної течії за висотою будинку

$$\alpha = 5,066 \bar{U}(Z) = 5,066 U_0 (h/h_0)^n . \quad (7)$$

Коефіцієнт тепловіддачі на боковій поверхні будинку, де формується область відриву потоку, визначаємо з урахуванням структури течії повітря вздовж неї: для області відриву, що відповідає місцеві прилипання потоку (координата $x/\delta_{отр} < 7$, де $\delta_{отр}$ – висота відривної області, x відраховується від координати положення δ_{max}) [6], $\alpha_n = 0,115 \rho \times U_D (\bar{x} + 5)$, при $U_D = 1,41 \cdot U_0$ [6, 7]. Після перетворення

$$\alpha = 0,162 \rho \cdot U_0 (0,23 \cdot \bar{x} + 5) , \quad (8)$$

де $\bar{x}=5$ відповідає зрушенню δ_{max} внаслідок впливу повороту потоку при русі в області градієнтної течії.

Коефіцієнт тепловіддачі для завітряної сторони будинку може бути прийнятий у вигляді [7] :

$$\alpha = 0,0199 Re_{cp}^{2/3} \cdot \lambda / L , \quad (9)$$

де L – довжина будинку, м; $Re_{cp} = U_0 n L / \nu_{cp}$; ν_{cp} – кінематична в'язкість, м²/с; λ – теплопровідність, Вт/(м·°C).

Коефіцієнт теплопередачі через вікна можна представити у вигляді:

$$k = 1/R_{ост} = 1 / \left(R_b + \sum_1^n R_c + \sum_1^n \frac{1}{\alpha_{л} + \alpha_{к}} + R_n \right)^{-1} . \quad (10)$$

Тут $R_b = 1/\alpha_b$; $R_c = \delta/\lambda$, де δ – товщина скла, λ – його теплопровідність; $R_n = 1/\alpha_n$; $\alpha_{к}, \alpha_{л}$ – коефіцієнти, відповідно, конвективного і

променевого теплообміну. Термічний опір скла приймаємо рівним $R_c = 0,00418 \text{ (м}^2\text{К)/Вт}$, а коефіцієнт радіаційного теплообміну $\alpha_{\text{д}} = 4,548 + 2,25 \cdot 10^{-2} t_2$, де t_2 – температура зовнішнього повітря.

При русі повітря в області градієнтної течії уздовж зовнішньої поверхні огороження і поверхні остеклення, утопленої на глибину $h \approx 0,2 \text{ м}$, на останній формується область відриву, для якої значення конвективної складової (коефіцієнта тепловіддачі) α_k дорівнює

$$\alpha_k = 1,1 \rho \times U_D, \quad (11)$$

де U_D – швидкість повітря вздовж поверхні поблизу віконного прорізу дорівнює $U_D = 0,54 \bar{U}(Z)$. У цьому випадку для вікон з навітряної сторони будинку можна прийняти (з урахуванням зміни швидкості вітру за висотою) $\alpha_k = 0,55 \rho \cdot \bar{U}(Z)$ і в області гальмування – згідно з рівнянням (5).

Теплові втрати з відходячим повітрям в результаті інфільтрації для квартир, що знаходяться з навітряної сторони, за час τ можна визначити як:

$$Q_{\text{вент}} = (16,61 (t_v - t_n) \cdot (\Delta P)^{\frac{2}{3}} \cdot F_{\text{ок}} + c_p \rho (t_v - t_n) \cdot W_k) \cdot \tau, \quad (12)$$

де $Q_{\text{вент}}$ – теплові втрати з відходячим повітрям у результаті інфільтрації і роботи природної витяжної вентиляції; ΔP – перепад тиску, який дорівнює

$$\Delta P = 5,50 \text{ Н} (\rho_n - \rho_v) + 3,0 \rho_n \cdot U_0^2. \quad (13)$$

Для квартир, що знаходяться на боковій і завітряній стороні, $Q_{\text{вент}} = c_p \rho_v (t_v - t_n) n W_k \text{ нт}$. В рівняннях: (12) $F_{\text{ок}}$ – опалювальна площа, м^2 , (13) – W_k – об'ємна витрата повітря в каналі витяжної вентиляції, яка для природних систем вентиляції приймається $0,175 \text{ м}^3/\text{с}$ [8].

Наведена вище методика керування тепловим режимом будівлі дозволяє при відомих геометричних і теплофізичних характеристиках житлових будинків визначити рівень тепловіддачі на зовнішніх стінових і світлопрозорих огороженнях з урахуванням швидкості та напрямку вітру; температуру джерела тепла кожного приміщення з урахуванням його розташування; а також теплове навантаження будинку або групи будівель.

1.Малыренко В.А. Основы теплофизики зданий и энергосбережения. – Х.: САГА, 2006. – 484 с.

2.Голощапов В.Н., Орлова Н.А. Выбор временного интервала изменения темпера-

туры наружного воздуха для системы управления отпуском тепла на ТЭЦ // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2005. – №4. – С.58-62.

3.СНИП II.3.-79**. Строительная теплотехника. Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.

4.Davenport A.G. The spectrum horizontal gustiness near the ground in high winds // Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1961. - № 87. – pp. 194-211.

5.Маляренко В.А., Голощапов В.Н., Барсуков В.А., Котульская О.В., Черноусенко О.Ю. Теплообмен и газодинамика в камерах отбора паровых турбин. – К.: Наук. думка, 1991. – 240 с.

6.Шляжас Р. Б. Турбулентный перенос импульса и тепла в пограничном слое за препятствием: Автореф. ... канд. техн. наук. – Каунас: Ин-т ФТПЭ, 1985. – 17 с.

7.Чжен П. Отрывные течения. Т.3. – М.: Мир, 1973. – 336 с.

8.Мхитарян Н.М. Энергосберегающие технологии в жилищном и гражданском строительстве. – К.: Наук. думка», 2000. – 412 с.

Отримано 06.09.2010

УДК 697.14

Л.В.ГИРМАН, В.А.ПАШИНСЬКИЙ, д-р техн. наук,

В.В.ШУЛЬГІН, канд. техн. наук

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

ПОРІВНЯННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ЗАМКНУТИМ ПОВІТРЯНИМ ПРОШАРКОМ

Виконано порівняння результатів експериментальних досліджень та теплотехнічних розрахунків за допомогою розроблених математичних моделей для визначення опору теплопередачі повітряного прошарку.

Выполнено сравнение результатов экспериментальных исследований и теплотехнических расчетов с помощью разработанных математических моделей для определения сопротивления теплопередачи воздушной прослойки.

Comparison of results of experimental researches and heating engineering calculations is executed by the developed mathematical models for determination of resistance of heat-transfer of air layer.

Ключові слова: тепломір, термopapa, потенціометр, віконний блок, повітряний прошарок, опір теплопередачі.

Для теплотехнічних розрахунків замкнутих повітряних прошарків розроблено математичні моделі [1-3], які дають можливість визначити фактори, що найбільш суттєво впливають на опір теплопередачі повітряного прошарку. Для оцінки достовірності цих моделей необхідно провести експериментальні дослідження та порівняти результати теоретичних розрахунків з експериментальними даними.

Мета роботи – провести експериментальні дослідження та порівняти експериментальні дані з результатами розрахунків, які виконува-